第38卷 第2期
2021年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 38 No. 2
Mar. 2021

黄土高原地区人工林营造——混交林模式生态效益研究

刘小娥[1]， 苏世平[1]， 李 毅[1]， 王 维[2]
（1. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃省天水市麦积区林业与草原局，甘肃 天水 741020）

摘 要： 为探讨不同类型人工林对土壤理化性质的改良能力，以兰州市南北两山5种典型林分类型（侧柏林、新疆杨林、刺槐林、侧柏刺槐混交林、新疆杨刺槐混交林）为研究对象，对0~80 cm土层的土壤理化性质进行了研究。结果表明：（1）不同林分类型混交林土壤容重、持水量、孔隙度、土壤含水量、渗透速率均好于纯林；两种混交林和侧柏林土壤pH低于刺槐林和新疆杨林；混交林土壤有机质、全氮、无机氮、全磷大于纯林；全钾、速效钾在不同林分类型之间差异不显著。（2）在0~80 cm土层范围内，各林分类型随着土壤深度的增加，土壤容重逐渐增加；土壤持水量、孔隙度逐渐降低；土壤含水量、土壤pH均在土层间无显著差异；土壤有机质、全氮、无机氮、速效磷、速效钾随土壤深度的增加逐渐降低，有表聚效应；全磷和全钾在土层间差异不显著。（3）土壤理化性质相关性分析发现：土壤有机质与土壤全氮、无机氮、全磷、持水量、孔隙度均呈极显著正相关，与土壤容重呈极显著负相关；土壤容重与土壤持水量、孔隙度均呈极显著负相关。混交林较纯林在改善土壤理化性质方面有更好的效果，建议该区域在今后人工林营造中以混交林为主，在现有纯林的抚育管理中可考虑将其改造为混交林。

关键词： 土壤理化性质；纯林；混交林；兰州市；黄土高原

森林土壤是森林生态系统的重要组成部分，是林木赖以生存的物质基础[1]，林木和生态系统中的养分通过土壤有机的联系在一起，相互影响，一方面，植物群落对其生长地的土壤物理化学性质有一定的影响，另一方面，土壤的理化性质又作用于群落的许多生态过程，并直接或间接的影响林木的生长[2]。土壤为林木的生长发育提供所需营养物质，林木将一部分养分通过枯枝落叶归还给林地，以此来改善林地的土壤结构，影响土壤的形成和发育[3-5]。因此，对相同立地条件下不同类型人工林土壤理化性质进行评价，有助于揭示二者之间的关系。土壤容重与孔隙度作为土壤最基本物理性质，影响土壤透气持水的能力，影响土壤的肥力，进而影响植物的生长状况[6]。土壤有机质、氮、磷、钾等养分元素是土壤肥力的主要组成部分，也是土壤生物赖以生存的根本[7]，土壤动物与微生物能促进土壤N、P、K等营养元素的转化和循环利用，进而影响土壤的理化性质、保水保肥和养分供应能力[8]。我国是人工林面积最大的国家，不同立地、不同树种组成的人工林类型繁多，因此，通过对同一立地条件下人工林群落土壤理化性质的研究，将有助于认识林分在生长过程中对土壤理化性质的改良效果，同时为实现人工林树种选择及调控提供一定的参考价值。

兰州市南北两山位于黄土高原丘陵区，由于黄土质地疏松，导致其抗侵蚀能力低，土壤易崩塌，透水性差，水土流失严重。自1926年开始人工造林[9]，至今，两山4×10^4 hm^2的荒山荒地已被绿化，大面积的人工林已初步发挥生态效益。不少学者在兰州市南北两山人工林的树种选择[10-11]、群落结构[12]、灌木林养分、水分、微生物[13-14]等方面作了大量研究。在早期探索造林阶段，由于重工程措施而轻生物措施，在整地过程中，盲目加大整地规格，造成表土深

收稿日期： 2020-07-18； **修订日期：** 2020-09-23
基金项目： 甘肃农业大学学科建设基金项目（GAU-XKJS-2018-103，GAU-XKJS-2018-102）；国家自然科学基金项目（32060335，41661067）；对发展中国家常规性科技援助项目（KY202002011）；中央财政林业科技推广示范资金项目（[2020]ZTYG15）；甘肃省自然科学基金项目（17JR5RA147）资助
作者简介： 刘小娥（1981-），女，讲师，主要从事水土保持与荒漠化防治等方面的研究. E-mail: liuxiaoe81@126.com
通讯作者： 苏世平. E-mail: susp008@163.com

翻,生土裸露,破坏了长期形成的土壤层次结构,降低了土壤水文效应,加速了水土流失,同时,在树种选择中没有完全遵循适地适树原则,致使部分林木生长不良,形成"小老头"树,导致林分生态效益发挥不佳[15]。因此,对兰州市南北两山经大规模整地后营造的人工林土壤理化性质进行研究,探讨不同树种组成的人工林在土壤理化性质、土壤肥力方面的改良能力,为该区域今后在人工林营造中树种选择提供一定的参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

兰州南北两山位于103°21′04″~104°00′38″E,35°53′18″~36°33′56″N,东西长60 km,南北宽5~50 km,面积42000 hm²。位于黄土高原最西端,为甘肃黄土高原陇中北部黄土丘陵、河谷盆地类型区,土壤为灰钙土,区域年降水量为327.7 mm,年蒸发量1468 mm,年均温为9.1 ℃,气候干旱,降雨稀少[16],属于半干旱区温带草原气候类型。区域内天然植被主要为草本及少量灌木,绝大多数为人工植被,乔木树种主要有:刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、新疆杨(*Populus alba* var *pyramidalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、国槐(*Sophora japonica*)等[17-18]。本研究选取该区域分布较广、面积较大的5种林分类型人工林进行林地土壤理化性质研究,各林分组成为:侧柏林,乔木层为侧柏,林内无其他乔木和灌木;刺槐林,乔木层为刺槐,灌木层为极少量白榆(*Ulmus pumila*)幼树,甘蒙柽柳(*Tamarix austrongolica*);新疆杨林,乔木层为新疆杨,灌木层为少量紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinkii*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*);新疆杨刺槐混交林,乔木层由新疆杨和刺槐组成,树种组成比例为:5新疆杨+5刺槐(数量比例),灌木层为少量柽柳,白榆幼树;侧柏刺槐混交林,乔木层为侧柏和刺槐组成,树种组成比例为3侧柏+7刺槐(数量比例),灌木层为少量柠条锦鸡儿、甘蒙柽柳、白榆。其他样地基本情况见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 在踏查的基础上,在兰州市南北两山选择5种造林时间基本一致的乔木人工林,于2019年8月,每种林分类型选取3个代表性样地,每样地选取3个10 m×10 m的代表性样方,调查林分结构(表1),然后在样方内沿对角线方向随机选取3个采样点,每点在其前后左右4棵树的对角线交点处,以避免取样点距树干基部太近而根系密集,影响数据的准确性。每个采样点挖1个土壤剖面,在每个剖面按照0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm和60~80 cm,采集4层土壤样品。将同一土层样品混合均匀后取0.5 kg带回实验室,风干后去除杂质、磨细后过2 mm、0.149 mm的筛,进行土壤化学性质测定。在挖好的土壤剖面上,用环刀(直径50.46 mm,高50 mm,容积100 cm³)采集0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm和60~80 cm土层的原状土,每个土层采集3个原状环刀土,带回实验室,供土壤物理性质测定。

1.2.2 测定指标与方法

(1) 物理性质:采用环刀法测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度;用烘干法测定土壤自然含水率;采用双环刀法测定土壤渗透性[19]。

(2) 化学性质:土壤pH采用电位法测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮采用半微量开氏法测定;土壤无机氮采用KCl浸提,连续流动分析仪测定;土壤全磷采用钼锑抗比色法测定;土壤速效磷采用$NaHCO_3$浸提比色法测定;土壤全钾采用火焰光度法测定;土壤速效钾采用乙酸铵浸提,火焰光度法测定,以上方法参考土壤农业化学

表1 样地基本情况

Tab. 1 Basic condition of different stand types

林分类型	郁闭度	海拔/m	林龄/a	平均树高/m	林分密度/(棵·hm⁻²)	土壤类型
侧柏林	0.85	1813	30	6.02	2977	灰钙土
刺槐林	0.70	1782	35	9.39	2700	灰钙土
新疆杨林	0.60	1772	35	11.06	2500	灰钙土
侧柏刺槐混交林	0.70	1761	30	6.13	2740	灰钙土
新疆杨刺槐混交林	0.65	1804	30	10.92	2801	灰钙土

分析方法[20]。

1.3 数据处理

利用SPSS 19.0软件进行方差分析、多重比较和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型土壤物理性质

2.1.1 土壤容重 不同林分类型之间土壤容重差异显著($P<0.05$)(表2),均值为1.22~1.36 g·cm^{-3},侧柏林>刺槐林>新疆杨林>侧柏刺槐混交林>新疆杨刺槐混交林,其中,侧柏林的土壤容重是新疆杨刺槐混交林的1.11倍,混交林的土壤容重小于纯林。土壤容重在土壤剖面上(0~80 cm)差异显著($P<0.05$)(表2),随着土壤深度的增加,土壤容重呈增加趋势,均值为1.17~1.40 g·cm^{-3},其中,60~80 cm的土壤容重分别是40~60 cm、20~40 cm和10~20 cm的1.04倍、1.10倍和1.20倍。

2.1.2 土壤孔隙度 不同林分类型之间土壤总孔隙度差异显著($P<0.05$)(表2),均值为49.14%~53.84%,新疆杨刺槐混交林>侧柏刺槐混交林>新疆杨林>刺槐林>侧柏林,其中,新疆杨刺槐混交林是侧柏林的1.10倍,混交林的土壤总孔隙度大于纯林。总孔隙度在土壤剖面上(0~80 cm)差异显著($P<0.05$)(表2),随着土壤深度的增加而降低,均值为47.82%~55.31%,其中0~20 cm的土壤总孔隙度分别是20~40 cm、40~60 cm和60~80 cm的1.06倍、1.11倍和1.16倍。

土壤毛管孔隙度在不同林分类型之间差异显著($P<0.05$)(表2),均值为43.68%~46.37%,新疆杨刺槐混交林>侧柏刺槐混交林>新疆杨林>刺槐林>侧柏林,其中,新疆杨刺槐混交林是侧柏林的1.06倍,混交林的土壤毛管孔隙度大于纯林。毛管孔隙度在土壤剖面上(0~80 cm)差异显著($P<0.05$)(表2),随着土壤深度的增加,毛管孔隙度逐渐降低,均值为42.19%~47.67%,其中,0~20 cm的土壤毛管孔隙度分别是20~40 cm、40~60 cm和60~80 cm的1.05倍、1.09倍和1.13倍。

不同林分类型之间非毛管孔隙度差异不显著($P>0.05$)(表2),均值为5.33%~7.48%。非毛管孔隙度在土壤剖面上(0~80 cm)差异显著($P<0.05$)(表2),随着土壤深度的增加而降低,均值为5.63%~7.64%,其中,0~20 cm的土壤非毛管孔隙度分别是20~40 cm、40~60 cm和60~80 cm的1.15倍、1.28倍和1.36倍。

2.1.3 土壤持水量 不同林分类型之间最大持水量差异显著($P<0.05$)(表2),均值为41.09%~52.75%,新疆杨刺槐混交林最大,侧柏林最小,混交林的最大持水量大于纯林。最大持水量在土壤剖面上(0~80 cm)差异显著($P<0.05$)(表2),随着土壤深度的增加最大持水量逐渐降低,0~20 cm的土壤最大持水量分别是20~40 cm、40~60 cm和60~80 cm的1.14倍、1.31倍和1.41倍。

不同林分类型之间毛管持水量和田间持水量均存在显著差异($P<0.05$)(表2),均为新疆杨刺槐混交林最大,侧柏林最小,毛管持水量和田间持水量均表现为:混交林大于纯林。在土壤剖面上(0~80 cm)毛管持水量和田间持水量均差异显著($P<0.05$)(表2),随着土壤深度的增加均呈现降低趋势。

2.1.4 土壤含水量 不同林分类型之间土壤含水量差异显著($P<0.05$)(表2),均值为4.36%~13.82%,混交林的土壤含水量大于纯林。在土壤剖面上(0~80 cm)土壤含水量无显著差异($P>0.05$)(表2),均值为6.78%~11.35%。

2.1.5 土壤渗透性 随着土壤深度的增加(0~80 cm),各林分类型土壤渗透速率均呈现降低趋势(图1)。不同林分类型之间土壤渗透速率各不相同(图1),并随着土壤深度的增加,各林分类型之间的差异逐渐减小,0~20 cm和20~40 cm土层,土壤渗透速率表现为:新疆杨刺槐混交林>侧柏刺槐混交林>刺槐林>侧柏林>新疆杨林;40~60 cm土层,新疆杨刺槐混交林土壤渗透速率大于其他4种林分类型,而该4种林分间差异不显著;60~80 cm各林分类型之间差异不显著。

2.2 不同林分类型土壤化学性质

2.2.1 土壤pH 不同林分类型之间土壤pH差异显著($P<0.05$)(表3),均值为8.02~8.36,根据我国土壤酸碱度分级[21],研究区为碱性土壤。土壤pH在土壤剖面上差异不显著,均值为8.10~8.23,在0~80 cm范围内,各林分土壤pH随着土壤深度的增加无明显变化规律(图2)。

2.2.2 土壤有机质 不同林分类型之间土壤有机质差异显著($P<0.05$)(表3),均值为6.11~11.67 g·kg^{-1},混交林的土壤有机质含量大于纯林,其中,新疆杨刺槐混交林是新疆杨林的1.91倍。有机质在土壤

表2　5种林分类型的土壤物理性质多重比较

Tab. 2　Multiple comparisons in physical properties of different soil horizons in 5 stand types

林分类型	土层/cm	土壤容重/(g·cm^{3})	最大持水量/%	毛管持水量/%	田间持水量/%	毛管孔隙/%	非毛管孔隙/%	总空隙度/%	土壤含水量/%
侧柏	0~20	1.24 ±0.03c	50.70 ±1.81a	37.85 ±1.71a	31.83 ±1.39a	46.67 ±0.90a	6.49 ±0.24a	53.16 ±1.07a	7.38 ±0.41a
	20~40	1.30 ±0.06bc	42.57 ±1.69c	35.67 ±2.45b	26.84 ±1.93b	45.92 ±1.18ab	5.29 ±0.68a	51.21 ±1.86ab	6.27 ±0.56a
	40~60	1.42 ±0.05ab	36.74 ±0.57c	29.53 ±2.59c	23.33 ±0.63c	41.79 ±2.09bc	5.17 ±0.68a	46.97 ±1.67bc	6.17 ±0.54a
	60~80	1.48 ±0.04a	34.34 ±2.34c	27.38 ±1.38c	21.60 ±0.62c	40.34 ±0.90c	4.87 ±0.62a	45.21 ±1.37c	4.01 ±0.97b
新疆杨	0~20	1.21 ±0.07b	47.52 ±6.83a	40.31 ±4.60a	32.50 ±4.14a	48.02 ±2.87a	6.07 ±0.79a	54.09 ±2.42a	5.23 ±0.50a
	20~40	1.36 ±0.05ab	43.16 ±6.61a	32.24 ±1.80ab	25.43 ±1.73ab	43.61 ±1.09ab	5.52 ±1.16a	49.14 ±1.66ab	4.74 ±0.18ab
	40~60	1.41 ±0.01a	38.10 ±2.81a	29.94 ±0.90b	24.05 ±1.42b	42.30 ±0.78ab	4.98 ±0.24a	47.29 ±0.54b	3.87 ±0.48ab
	60~80	1.44 ±0.03a	36.25 ±1.82a	29.29 ±1.63b	23.26 ±1.12b	41.91 ±1.44b	4.73 ±0.51a	46.63 ±0.98b	3.59 ±0.39b
刺槐	0~20	1.25 ±0.05a	50.01 ±2.40a	36.20 ±2.23a	29.69 ±0.21a	44.95 ±1.07a	7.83 ±0.56a	52.78 ±1.62a	11.92 ±0.58a
	20~40	1.28 ±0.06a	44.17 ±1.50b	34.86 ±2.76a	28.80 ±0.56a	44.25 ±1.49a	7.53 ±0.73a	51.78 ±1.89a	7.23 ±1.26b
	40~60	1.30 ±0.09a	39.80 ±1.68bc	34.45 ±3.45a	28.58 ±0.52a	44.26 ±1.41a	6.72 ±1.98a	50.99 ±2.88a	5.59 ±0.81b
	60~80	1.35 ±0.04a	37.13 ±1.33c	31.49 ±0.61a	27.24 ±1.86a	42.55 ±0.38a	6.76 ±1.62a	49.31 ±1.24a	7.09 ±1.38b
侧柏刺槐	0~20	1.11 ±0.04b	55.29 ±2.13a	44.31 ±2.10a	34.66 ±2.48a	49.08 ±0.80a	8.22 ±0.38a	57.29 ±1.17a	15.20 ±0.71a
	20~40	1.25 ±0.02a	48.37 ±0.80ab	36.18 ±0.21b	28.93 ±0.72ab	45.33 ±0.91ab	7.28 ±1.49a	52.61 ±0.59b	13.66 ±0.07ab
	40~60	1.31 ±0.04a	41.67 ±2.39bc	34.40 ±2.01b	27.80 ±0.33b	44.70 ±1.44b	6.23 ±0.95a	50.93 ±1.32b	12.36 ±0.56b
	60~80	1.34 ±0.03a	37.79 ±3.00c	32.65 ±1.88b	26.21 ±2.48b	43.69 ±1.48b	5.99 ±0.48a	49.68 ±1.04b	9.69 ±0.32c
新疆杨刺槐	0~20	1.05 ±0.02d	63.93 ±2.14a	47.17 ±0.65a	39.11 ±0.70a	49.63 ±1.10a	9.60 ±1.70a	59.23 ±0.69a	17.00 ±0.28a
	20~40	1.16 ±0.02c	55.60 ±1.12b	41.27 ±0.78b	34.31 ±1.38ab	47.92 ±0.16ab	7.70 ±0.56ab	55.62 ±0.64b	15.13 ±0.58b
	40~60	1.26 ±0.02b	47.26 ±3.28c	36.03 ±0.85c	32.80 ±0.55bc	45.48 ±0.78b	6.80 ±0.81ab	52.28 ±0.52c	13.62 ±0.15c
	60~80	1.39 ±0.02a	44.21 ±1.90c	30.66 ±0.70d	28.01 ±3.15c	42.44 ±0.67c	5.81 ±0.82b	48.25 ±0.64d	9.52 ±0.62d
	0~20	1.17±0.04c	53.49 ±2.90a	41.17 ±2.03a	33.56 ±1.60a	47.67 ±0.85a	7.64 ±0.63a	55.31 ±1.26a	11.35 ±2.24a
	20~40	1.27±0.03bc	46.77 ±2.43ab	36.05 ±1.47b	28.86 ±1.51b	45.41 ±0.75b	6.66 ±0.52ab	52.07 ±1.06b	9.40 ±2.09a
	40~60	1.34±0.03ab	40.71 ±1.83bc	32.87 ±1.31bc	27.31 ±1.71b	43.71 ±0.71bc	5.98 ±0.38b	49.69 ±1.08bc	8.32 ±1.95a
	60~80	1.40±0.03a	37.94 ±1.67c	30.29 ±0.91c	25.26 ±1.22b	42.19 ±0.55c	5.63 ±0.38b	47.82 ±0.84c	6.78 ±1.30a
侧柏		1.36±0.03a	41.09±0.84c	32.61 ±1.50b	25.90 ±0.25c	43.68 ±1.03b	5.46 ±0.35a	49.14 ±1.11b	5.96 ±0.08d
新疆杨		1.30±0.05ab	42.78±0.89bc	34.25 ±2.08b	28.58 ±0.40bc	44.00 ±0.74ab	7.21 ±1.19a	51.21 ±1.80ab	7.96 ±0.50c
刺槐		1.35±0.03a	41.26±1.67c	32.95 ±1.45b	26.31 ±1.73bc	43.96 ±0.78ab	5.33 ±0.38a	49.29 ±0.98b	4.36 ±0.11e
侧柏刺槐		1.25±0.01ab	45.78±1.03b	36.88 ±0.68ab	29.40 ±1.06b	45.70 ±0.85ab	6.93 ±0.70a	52.63 ±0.14ab	12.73 ±0.18b
新疆杨刺槐		1.22±0.01b	52.75±1.00a	38.78 ±0.48a	33.56 ±0.89a	46.37 ±0.05a	7.48 ±0.51a	53.84 ±0.49a	13.82 ±0.26a

注:同一列不同小写字母表示同一林分类型不同土层之间差异显著或不同土层之间差异显著或不同林分类型间差异显著($P < 0.05$)。下同。

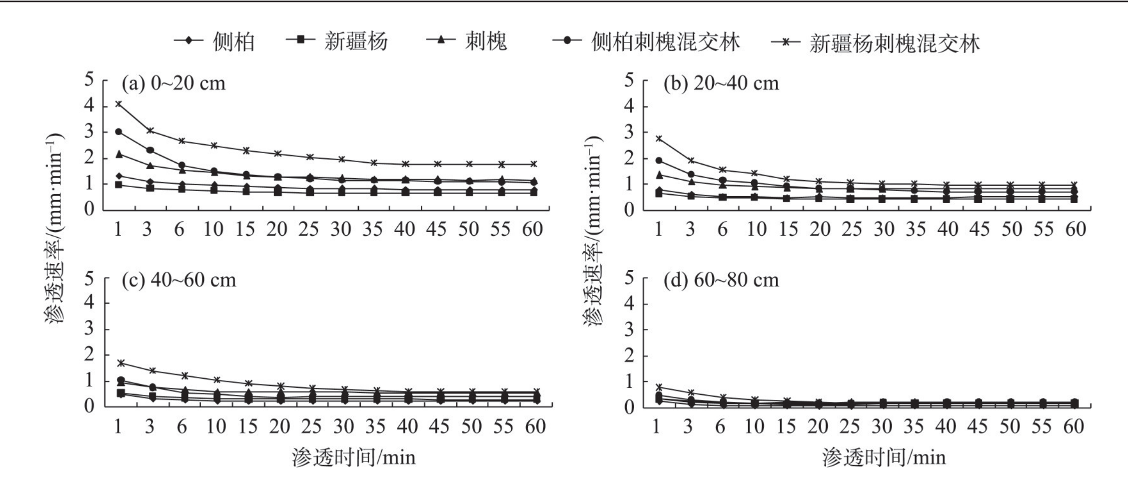


图1 5种林分类型各土层的土壤渗透过程

Fig. 1 Soil infiltration process in each soil layer of 5 stand types

表3 不同林分类型的土壤化学性质

Tab. 3 Chemistry properties of different soil horizons in different stand types

林分类型或土层厚度/cm	pH	有机质/($g\cdot kg^{-1}$)	全氮/($g\cdot kg^{-1}$)	无机氮/($mg\cdot kg^{-1}$)	全磷/($g\cdot kg^{-1}$)	速效磷/($mg\cdot kg^{-1}$)	全钾/($g\cdot kg^{-1}$)	速效钾/($mg\cdot kg^{-1}$)
0~20	8.23±0.09a	15.99±1.95a	0.76±0.06a	30.95±5.44a	0.73±0.03a	6.39±0.39a	17.90±0.12a	85.50±0.52a
20~40	8.21±0.07a	8.32±1.49b	0.60±0.07ab	23.00±4.13ab	0.69±0.03a	4.51±0.50b	17.96±0.41a	74.43±0.79b
40~60	8.10±0.07a	4.90±0.68bc	0.47±0.06bc	16.63±3.08b	0.68±0.02a	4.19±0.57b	18.28±0.30a	66.58±1.15c
60~80	8.23±0.11a	3.87±0.46c	0.31±0.03c	12.54±3.10b	0.66±0.02a	3.88±0.79b	18.55±0.38a	57.04±1.00d
侧柏	8.12±0.12bc	6.24±0.62b	0.47±0.01d	14.90±0.06d	0.63±0.02b	4.08±0.1bc	18.52±0.17a	72.48±1.08a
新疆杨	8.34±0.07ab	6.11±0.83b	0.40±0.02e	12.66±0.38e	0.69±0.03ab	5.51±0.21a	18.17±0.30a	71.52±1.42a
刺槐	8.36±0.03a	7.19±0.69b	0.54±0.01c	17.72±0.35c	0.64±0.01b	5.04±0.35ab	18.77±0.09a	70.77±0.68a
侧柏刺槐	8.02±0.02c	10.14±0.33a	0.59±0.01b	25.40±1.80b	0.75±0.03a	3.44±0.23c	17.25±0.34a	69.34±1.58a

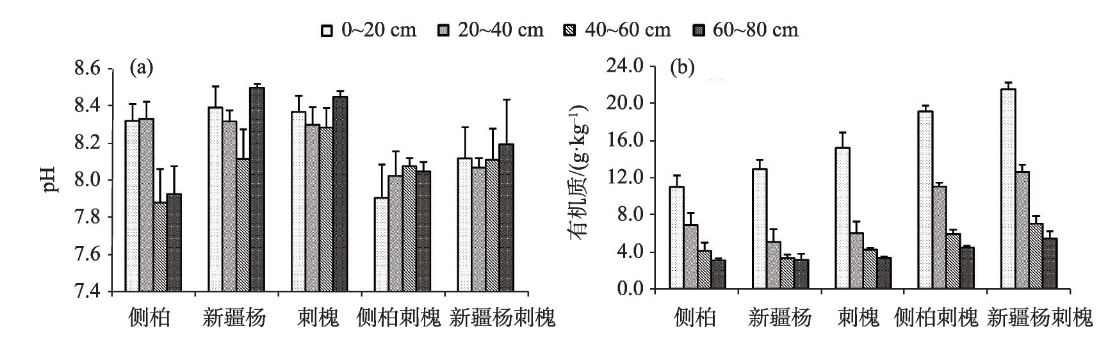


图2 5种林分类型土壤pH及有机质含量

Fig. 2 Soil pH and organic matter content under 5 stand types

剖面上差异显著($P<0.05$)(表3),均值为3.87~15.99 $g\cdot kg^{-1}$。随着土壤深度的增加(0~80 cm),各林分类型土壤有机质呈下降趋势,且表层(0~20 cm)土壤有机质含量显著高于其他土层(图2)。

2.2.3 土壤氮 不同林分之间土壤全氮和无机氮均差异显著($P<0.05$)(表3),均值分别为0.40~0.68 $g\cdot kg^{-1}$和12.66~33.22 $mg\cdot kg^{-1}$,均表现为混交林大于纯林,其中,新疆杨刺槐混交林的土壤全氮和无机氮分别是是新疆杨林的1.70倍和2.62倍。全氮和无机氮在土壤剖面上差异显著($P<0.05$)(表3),均值分别为0.31~0.76 $g\cdot kg^{-1}$和12.54~30.95 $mg\cdot kg^{-1}$。随着土壤深度的增加(0~80 cm),各林分类型土壤全

氮和无机氮均呈下降趋势(图3)。

2.2.4 土壤磷 不同林分类型之间土壤全磷差异显著($P<0.05$)(表3)，均值为0.63~0.75 $g·kg^{-1}$，表现为：混交林大于纯林，其中，侧柏刺槐混交林是侧柏林的1.19倍。全磷在土壤剖面上无显著差异($P>0.05$)(表3)，均值为0.66~0.73 $g·kg^{-1}$，各林分土壤全磷在土壤剖面上无明显变化规律(图4)。

不同林分类型之间土壤速效磷差异显著($P<0.05$)(表3)，均值为3.44~5.66 $mg·kg^{-1}$，新疆杨刺槐混交林＞新疆杨林＞刺槐林＞侧柏林＞侧柏刺槐混交林，其中，新疆杨刺槐混交林是侧柏刺槐混交林的1.65倍。速效磷在土壤剖面上差异显著($P>0.05$)(表3)，均值为3.88~6.39 $mg·kg^{-1}$(图4)。

2.2.5 土壤钾 全钾在不同林分类型之间和土壤剖面上均无显著差异($P>0.05$)(表3)，各林分类型土壤全钾在土壤剖面上无明显变化规律(图5)。

速效钾在不同林分类型之间无显著差异($P>0.05$)(表3)，而在土壤剖面上差异显著($P<0.05$)(表3)，均值为57.04~85.50 $mg·kg^{-1}$，随着土壤深度的增加呈降低趋势(图5)。

2.3 不同林分类型土壤理化性质相关性分析

5种林分类型土壤物理性质和化学性质各指标之间相关性分析发现(表4)，有机质与全氮、无机氮、全磷、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、毛

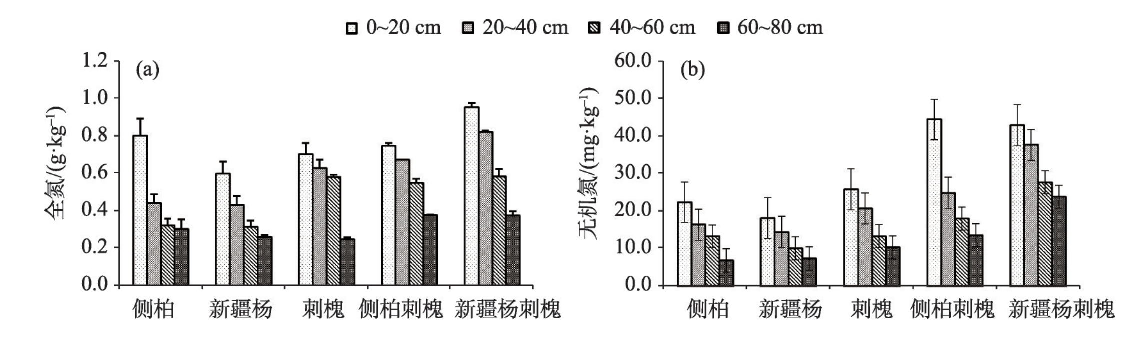


图3 5种林分类型土壤全氮和无机氮含量

Fig. 3 Total nitrogen content and mineral nitrogen content under 5 stand types

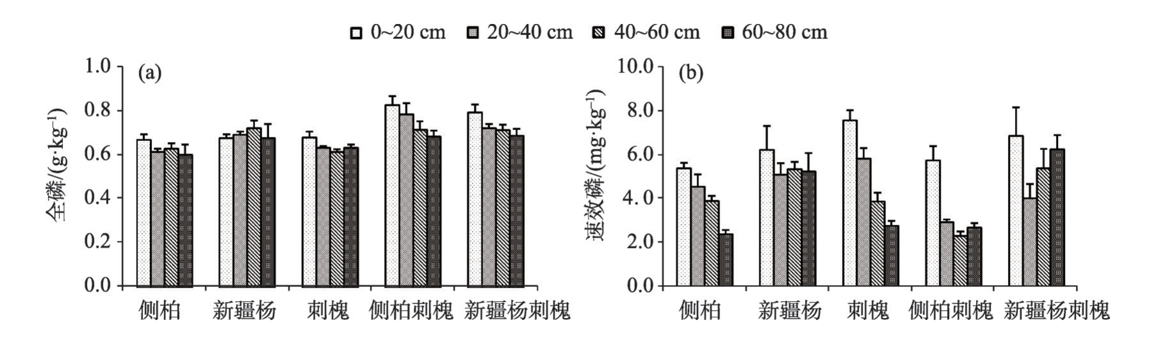


图4 5种林分类型土壤全磷和速效磷含量

Fig. 4 Total phosphorus content and available phosphorus content under 5 stand types

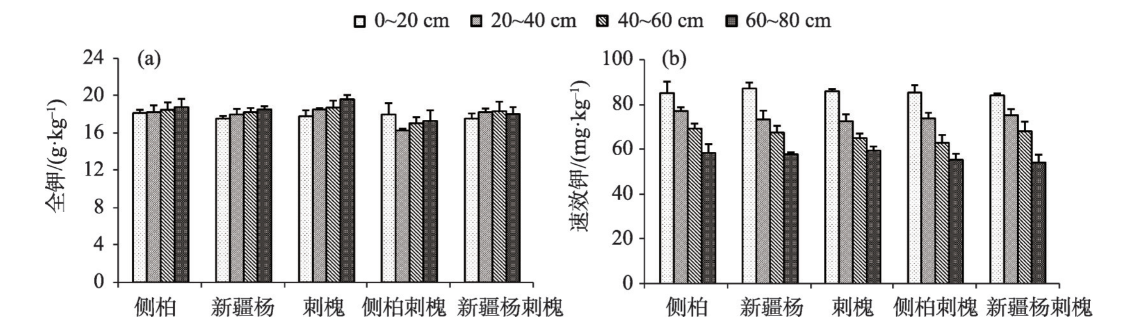


图5 5种林分类型土壤全钾和速效钾含量

Fig. 5 Total potassium content and available potassium content under 5 stand types

表4 0~80 cm土壤理化性质参数间的相关系数(Pearson双侧相关)

Tab. 4 Pearson correlation coefficient among soil properties (0-80 cm soil layer, n=15)

土壤参数	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
X_1pH	1														
X_2有机质	−0.428	1													
X_3全氮	−0.454	0.829**	1												
X_4无机氮	−0.492	0.903**	0.947**	1											
X_5全磷	−0.310	0.755**	0.401	0.533*	1										
X_6速效磷	0.374	−0.101	0.043	0.016	−0.232	1									
X_7全钾	0.490	−0.455	−0.228	−0.371	−0.730**	0.391	1								
X_8速效钾	−0.079	−0.368	−0.233	−0.273	−0.234	0.155	0.271	1							
X_9容重	0.402	−0.753**	−0.812**	−0.723**	−0.467	0.004	0.243	0.235	1						
X_{10}最大持水量	−0.358	0.814**	0.897**	0.868**	0.483	0.202	−0.300	−0.284	−0.763**	1					
X_{11}毛管持水量	−0.442	0.755**	0.797**	0.748**	0.483	0.029	−0.269	−0.203	−0.981**	0.775**	1				
X_{12}田间持水量	−0.268	0.743**	0.830**	0.846**	0.422	0.298	−0.167	−0.312	−0.774**	0.775**	0.820**	1			
X_{13}毛管孔隙度	−0.501	0.685**	0.668**	0.678**	0.509	−0.011	−0.304	−0.079	−0.865**	0.652**	0.934**	0.769**	1		
X_{14}非毛管孔隙度	−0.130	0.543*	0.691**	0.515*	0.212	0.034	−0.049	−0.313	−0.788**	0.609*	0.670**	0.502	0.373	1	
X_{15}总孔隙度	−0.395	0.746**	0.819**	0.726**	0.446	0.011	−0.224	−0.228	−0.999**	0.762**	0.977**	0.777**	0.852**	0.804**	1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关,*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

管孔隙度、总孔隙度均呈极显著正相关，与非毛管孔隙度呈显著正相关，与容重呈极显著负相关；全氮与无机氮、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度均呈极显著正相关，与容重呈极显著负相关；无机氮与最大持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度、总孔隙度均呈极显著正相关，与全磷、非毛管孔隙度呈显著正相关，与容重呈极显著负相关；全磷与全钾呈极显著负相关关系；容重与最大持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度均呈极显著负相关。表明土壤的理化性质各指标之间相互影响，其中，土壤有机质的改变在其它理化性质方面具有关键性的作用[22]。

3　讨 论

林木从土壤中吸收养分和水分来完成其生长发育过程，吸收的养分一部分以凋落物的形式向土壤中输送，土壤养分输出和输入的动态平衡与林分类型、林分密度、树种组成、凋落物的分解速度等密切相关[23]，土壤有机质的增加使林分土壤的物理性质发生改变，而土壤物理性质的改变又影响林木根系对土壤养分的吸收，从而影响林木的生长发育。

3.1　不同林分类型土壤物理性质

不同林分类型因其树种组成不同，林木根系生长发育及凋落物的年累积量和分解程度不同，从而导致不同林分土壤物理性质产生差异[2,22]。本研究发现，混交林的土壤容重、孔隙度好于纯林，这可能一方面与不同树种根系分布规律有关，另一方面与不同树种的凋落物输入量和分解程度有关。有研究表明，刺槐的绝大多数根系集中于0~120 cm层[24]，新疆杨80%以上的根系分布于0~40 cm层[25]。也有研究表明，兰州市南北两山立地条件下，侧柏林分根系主要分布在0~50 cm土层[26]。因此，混交林深根系浅根系互补分布于土壤中，增大了土壤养分的吸收空间，较多根系的伸展能够增加土壤的孔隙度，降低土壤容重。另外，刺槐属于固氮树种，根瘤菌通过对大气中N_2的固定，提高土壤中无机氮的含量，有利于促进与其混交的新疆杨和侧柏的生长，故混交林有较大的凋落物累积量和厚度（新疆杨刺槐混交林为47.01 t·hm^{-2}；侧柏刺槐混交林为35.15 t·hm^{-2}），向土壤中输入的有机质较多，有机质能够增加土壤通透性，降低土壤容重，增大孔隙度。侧柏林土壤容重最大，孔隙度最小，是因为针叶林凋落物分解相对较慢，有机质归还量较少所致[23]。

土壤水是土壤最重要的组成部分之一，是森林生态系统水循环的重要环节，对土壤中养分运输和植物生长有重要的意义。本研究发现，混交林土壤含水量大于纯林，是因为混交林有较大的凋落物累积量，增加了对降水的拦截能力，并抑制了土壤水分的蒸发。5种林分类型的土壤含水量均随着土壤深度的增加呈现降低趋势，是因为研究区位于半干旱区，降水是土壤水分的主要来源，土层越深，水分补给越少，这与魏强等[2]对兴隆山6种森林类型土壤理化性质研究结果一致。不同林分类型之间土壤持水量存在差异，混交林大于纯林，是由于混交林土壤孔隙度高于纯林，有利于吸持更多的毛管水和非毛管水。

土壤渗透性是评价土壤水文效应的重要指标，是反应林分水土保持和涵养水源的重要水文参数[27-28]，土壤渗透性不但受降雨量的大小和时长的影响，而且受林分类型、林分结构、密度、根系分布和凋落物的累积量等诸多因素的影响[29-30]。本研究发现，混交林土壤的渗透性好于纯林，说明混交林能有效减少地表径流，减少水土流失，促进雨水下渗，提高林地的土壤含水量，产生以上结果的原因是混交林具有较高的非毛管孔隙度。赵洋毅等[31-32]研究表明，土壤渗透性指标与非毛管孔隙呈极显著正相关，与毛管孔隙关系不显著，说明非毛管孔隙对土壤渗透性的影响起更重要的作用，而本研究也表明，土壤渗透特性（最初渗透率、稳渗率、平均渗透率、总渗透量）与土壤非毛管孔隙度相关系数分别为0.585*、0.650**、0.618*、0.625*，呈极显著或显著正相关关系。

3.2　不同林分类型土壤化学性质

土壤pH是表征土壤酸碱性的指标，在森林土壤中，因不同林分类型的凋落物成分不同而不同[33]。本研究发现研究区土壤为碱性，pH为8.02~8.34，但不同林分类型之间土壤pH差异显著。混交林和侧柏林的土壤pH较小，刺槐林和新疆杨林较大，原因是混交林土壤较纯林更湿润，土壤微生物活性增强，有机质分解加快，产生大量的CO_2和有机酸[34]，导致混交林土壤pH变小。有研究表明，针叶林在长期的生长发育过程中，凋落物分解后形成的有机酸较多，盐基较少，导致侧柏林土壤pH逐渐降低，

土壤呈现酸化现象[35]。

土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标之一，是植物生长所需的各种营养元素的重要来源，也是土壤微生物维持其生命活动的能源，对土壤的物理、化学性质和生物学性质有重要的影响[2,36]。本研究发现，土壤有机质随着土壤深度的增加呈降低趋势，混交林土壤有机质显著大于纯林（$P<0.05$），这与陈瑞梅等[37-38]的研究结果相似，因为凋落物是森林土壤有机质的主要来源，从而土壤有机质呈现表聚效应。路翔等[39]研究表明，混交林的冠层厚，叶面积指数较大，凋落物累积量大，成分复杂，比纯林更能提高土壤肥力，且混交林能有效减少土壤水分蒸发，增加空气湿度，加快微生物对凋落物的分解[40]，从而提高了有机质的含量。

全氮、全磷、全钾是土壤养分的储备指标，无机氮、速效磷、速效钾的含量反应土壤实时养分的供应状况[41-42]。本研究发现，混交林的土壤全氮和无机氮均大于纯林，并且各林分土壤全氮和无机氮随着土壤深度的增加均呈降低趋势，是因为森林土壤的氮素主要来自于凋落物[43]，混交林的凋落物累积量大于纯林，这与路翔等[39]的研究结果相似。全磷在土壤剖面上无显著差异，全钾和速效钾在不同林分之间无显著差异，是因为森林土壤磷和钾的主要来源为岩石分化和矿物质的形成，由于同一区域的土壤母质基本相同，导致不同土壤深度之间、不同林分类型之间，土壤磷和钾差异不大，这与魏强等[2]对兴隆山6种森林类型土壤理化性质研究结果一致。

3.3 不同林分类型土壤物理性质和化学性质的相关性

本研究发现，5种林分类型土壤物理性质和化学性质各指标之间存在相关性，有机质与全氮、无机氮、全磷、持水量、孔隙度均呈显著正相关，与容重呈极显著负相关，这与常超等[44]对三峡库区不同植被类型土壤养分和魏强等[2]对兴隆山不同森林类型土壤的理化性质的研究结果一致。而不同林分类型土壤理化性质的差异是由于凋落物输入量以及分解程度不同所致，混交林具有较大的凋落物累积量，尤其是新疆杨刺槐混交林，累积量最大（47.01 $t\cdot hm^{-2}$），分解程度最高（66.49%），增加了土壤养分的积累，土壤有机质含量的提高增加了土壤的孔隙度和持水的能力，降低了土壤容重，土壤理化性质的改善，为林木的生长提供了更好的环境。

4 结 论

（1）混交林土壤容重、持水量、孔隙度、土壤含水量、渗透速率均好于纯林，其中，最优林分（杨树刺槐混交林）的土壤容重、最大持水量、田间持水量、总孔隙度分别为1.22 $g\cdot cm^{-3}$、52.75%、33.56%、53.84%；混交林土壤有机质、全氮、无机氮、全磷大于纯林，最优林分（杨树刺槐混交林）的土壤有机质和土壤全氮分别为11.67 $g\cdot kg^{-1}$和0.68 $g\cdot kg^{-1}$；全钾、速效钾在各林分之间无显著差异。

（2）随着土壤深度的增加（0~80 cm），土壤容重呈增加趋势；土壤持水量、孔隙度呈降低趋势；土壤含水量和土壤pH在土层间差异不显著；土壤有机质、全氮、无机氮、速效磷、速效钾随土壤深度的增加呈降低趋势，表明有表聚现象；全磷和全钾在土层间无显著差异。

（3）土壤有机质与土壤全氮、无机氮、全磷、持水量、孔隙度均呈极显著正相关，与土壤容重呈极显著负相关，土壤有机质的改变在其他理化性质方面具有关键性的作用。

参考文献（References）：

[1] 陈晨, 高明, 郑杰炳, 等. 缙云山不同森林植被下土壤理化性状研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 88−92. [Chen Chen, Gao Min, Zheng Jiebin, et al. Investigation of the physico-chemical properties of the soil under different types of forest vegetation[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2010, 32(3): 88−92.]

[2] 魏强, 凌雷, 柴春山, 等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4700−4713. [Wei Qiang, Ling Lei, Chai Chunshan, et al. Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4700−4713.]

[3] 陈利, 薛超文, 王小燕, 等. 文昌市5种不同森林类型土壤物理性质分析研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(32): 118−120. [Chen Li, Xue Chaowen, Wang Xiaoyan, et al. Study on soil physical properties of five different forest types in Wenchang City[J]. Journal of Anhui Agicultural Science, 2017, 45(32): 118−120.]

[4] 杨承栋. 我国人工林土壤有机质的量和质下降是制约林木生长的关键因子[J]. 林业科学, 2016, 52(12): 1−12. [Yang Chendong. Decline of quantity and quality of soil organic matter is the key factor restricting the growth of plantation in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(12): 1−12.]

[5] 于福科, 黄新会, 王克勤, 等. 桉树人工林生态退化与恢复研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 393−398. [Yu Fuke,

Huang Xinhui, Wang Keqin, et al. An overview of ecological degradation and restoration of *Eucalyptus* plantation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(2): 393-398.]

[6] 庞学勇, 包维楷, 张咏梅. 岷江上游中山区低效林改造对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持通报, 2005, 25(5):16-20. [Pang Xueyong, Bao Weikai, Zhang Yongmei. Effect of low-quality and benefit forest improvement on soil physical properties in middle-mountain of upper reaches of Minjiang River[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(5): 16-20.]

[7] 肖灵香, 方晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区4种森林类型土壤理化性质[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(5): 90-97, 108. [Xiao Lingxiang, Fang Xi, Xiang Wenhua, et al. Soil physical and chemical properties of four subtropical forests in hilly region of central Hunan province, China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(5): 90-97, 108.]

[8] 周婉娟, 石珊奇, 宿少锋, 等. 5种森林类型土壤理化性质分析[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(13): 114-118. [Zhou Wanjuan, Shi Shanqi, Su Shaofeng, et al. Soil physical and chemical properties of five subtropical forests[J]. Journal of Anhui Agicultural Science, 2017, 45(13): 114-118.]

[9] 吴庆龙. 兰州南北两山绿化造林工程的适宜性分析[J]. 水土保持研究, 2003, 10(3): 134-136. [Wu Qinglong. The applicability analysis of massive artificial forestation in Lanzhou South-north hills [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(3): 134-136.]

[10] 李禄军, 蒋志荣, 李正平, 等. 3树种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 253-259. [Li Lujun, Jiang Zhirong, Li Zhengping, et al. Comprehensive evaluation on drought-resistance of three tree species and the choice of drought-resistance indexes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(6): 253-259.]

[11] 蒋志荣, 梁旭婷, 朱恭, 等. 4树种主要生理指标对模拟水分胁迫的响应[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 485-492. [Jiang Zhirong, Liang Xuting, Zhu Gong, et al. Responses of main physiological indexes of four tree species to simulating water stress[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(3): 485-492.]

[12] 周资行, 李毅, 焦健. 兰州市南北两山不同生境红砂种群数量动态研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1726-1737. [Zhou Zihang, Li Yi, Jiao Jian. Quantity dynamics of *Reaumuria soongorica* populations from different habitats in the South-north hills in Lanzhou[J]. Journal of Natural Resourse, 2011, 26(10): 1726-1737.]

[13] 钟芳, 赵瑾, 孙荣高, 等. 兰州南北两山五类乔灌木林草地土壤养分与土壤微生物空间分布研究[J]. 草业学报, 2010, 19(3): 94-101. [Zhong Fang, Zhao Jin, Sun Ronggao, et al. Research on soil moisture retention capacity and soil infiltration property of different kinds of artificial forests in Northern Mountain of Lanzhou [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(3): 94-101.]

[14] 陈小红, 段争虎, 宋耀选, 等. 兰州市南北两山人工灌木林地土壤水分动态[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 532-535. [Chen Xiaohong, Duan Zhenghu, Song Yaoxuan, et al. Soil water dynamic in planted shrubs in southern and northern mountains of Lanzhou city [J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(4): 532-535.]

[15] 赵克昌, 屈连宝. 兰州南北两山植被恢复策略[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 493-497. [Zhao Kechang. Qu Lianbao. Strategy of vegetation restoration in Lanzhou north-south mountains[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(3): 493-497.]

[16] 张晓梅, 邸利, 史再军, 等. 甘肃泾川中沟小流域不同坡位刺槐人工林土壤水分特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1300-1308. [Zhang Xiaomei, Di Li, Shi Zaijun. Soil moisture content under artificial *Robinnia pseudoacacia* forest at different slope positions in the Zhonggou minor basin, Jingchuan County, Gansu Province [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1300-1308.]

[17] 武利玉, 苏世平, 王蕙. 兰州南北两山绿化区植物与植被类型初查[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 564-568. [Wu Liyu, Su Shiping, Wang Hui. Preliminary investigation into plant and vegetation types in afforestation region in Southern and Northern Mountains of Lanzhou City[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(4): 564-568.]

[18] 武田英文, 何存成, 泽田智志, 等. 兰州市南北两山造林树种的生长过程解析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 832-836. [Takeda Hidefumi, He Cuncheng, Sawata Satoshi, et al. Growth of *Platycladus orientalis* plantation at the north and south mountainside afforestation in Lanzhou[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 832-836.]

[19] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 中国林业出版社, 1986: 1-45. [Zhang Wanru, Xu Bentong. Study Method of Forest Ssoil[M]. Beijing: China Forestry Publishing Press, 1986: 1-45.]

[20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 474-490. [Lu Rukun. Analysis Methods of Soil Agricultural Chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 474-490.]

[21] 熊毅, 李庆逵. 中国土壤(第二版) [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 433-443. [Xiong Yi, Li Qingkui. Chinese Soil [M]. 2nd Ed. Beijing: Science Press, 1990: 433-443.]

[22] 秦娟, 唐心红, 杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 598-604. [Qin Juan, Tang Xinhong, Yang Xuemei. Effects of soil physical and chemical properties on different forest types of *Pinus massoniana*[J]. Ecology Environment Science, 2013, 22(4): 598-604.]

[23] 郭婧, 喻林华, 方晰, 等. 中亚热带4种森林凋落物量、组成、动态及其周转期[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4668-4677. [Guo Jing, Yu Linhua, Fang Xi, et al. Litter production and turnover in four types of subtropical forests in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4668-4677.]

[24] 薛文鹏, 赵忠, 李鹏, 等. 王东沟不同坡向刺槐细根分布特征研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 227-232. [Xue Wenpeng, Zhao Zhong, Li Peng, et al. Researches on root distribution characteristics of *Robiniap seudoacacia* stand in Wangdonggou on different site conditions[J]. Journal of Northwest Science Technology University of Agricultural and Forestry (Natural Science Edition), 2003, 31(6): 227-232.]

[25] 张毓涛, 胡莎莎, 李吉玫, 等. 新疆3种主要森林类型根系生物量变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 269-276. [Zhang

Yutao, Hu Shasha, Li Jimei, et al. Characteristic of root biomass of three main forest types in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(2): 269–276.]

[26] 钟芳, 王红赤, 李俊年, 等. 兰州市南北两山水热条件对侧柏根系分布的影响[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 559–563. [Zhong Fang, Wang Hongchi, Li Junnian, et al. Influence of water-heat condition on distribution of *Platycladus orientalis* L. Franco roots in Southern and Northern Mountains of Lanzhou City[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(4): 559–563.]

[27] 喻明美, 谢正生. 广州市白云山五种森林类型的土壤渗透性研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 153–156. [Yu Mingmei, Xie Zhengsheng. Study on soil permeability capability of five forest types in Baiyunshan scenic spot of Guangzhou[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1): 153–156.]

[28] 刘道平, 陈三雄, 张金池, 等. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 493–498. [Liu Daoping, Chen Sanxiong, Zhang Jinchi, et al. Soil infiltration characteristics under main vegetation types in Anji County of Zhejiang province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 493–498.]

[29] 刘广路, 范少辉, 漆良华, 等. 不同类型毛竹林土壤渗透性研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 44–46, 56. [Liu Guanglu, Fan Shaohui, Qi Lianghua, et al. Soil Infiltration characteristics of different *Phyllostachys pubescens* forests[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(6): 44–46, 56.]

[30] 漆良华, 张旭东, 周金星, 等. 湘西北小流域典型植被恢复群落土壤贮水量与入渗特性[J]. 林业科学, 2007, 43(4): 1–8. [Qi Lianghua, Zhang Xudong, Zhou Jinxin, et al. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of vegetation restoration communities in watershed, Northwest Hunan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(4): 1–8.]

[31] 赵洋毅, 王玉杰, 王云琦, 等. 渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4162–4172. [Zhao Yangyi, Wang Yujie, Wang Yunqi, et al. Effects of structures of plantation forests on soil infiltration characteristics in source water protect areas in Northern Chongqing City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4162–4172.]

[32] 刘霞, 张光灿, 李雪蕾, 等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 1–5. [Liu Xia, Zhang Guangcan, Li Xuelei, et al. Characteristics of soil infiltration and water-holding of different forest vegetation in ecological rehabilitation of small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 1–5.]

[33] 符云鹏, 王小翠, 陈雪, 等. 毕节烟区土壤pH值分布状况及与土壤养分的关系[J]. 土壤, 2013, 45(1): 46–51. [Fu Yunpeng, Wang Xiaocui, Chen Xue, et al. Distribution of soil pH and its relationships with soil nutrients in Bijie tobacco-growing area[J]. Soils, 2013, 45(1): 46–51.]

[34] Paul K I, Black A S, Conyers M K. Effect of plant residue return on the development of surface soil pH gradients[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 33(1): 75–82.

[35] 张庆费, 由文辉, 宋永昌. 浙江天童植物群落演替对土壤化学性质的影响[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 19–22. [Zhang Qingfei, You Wenhui, Song Yongchang. Effect of plant community succession on soil chemical properties in Tiantong, Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(1): 19–22.]

[36] 刘永贤, 熊柳梅, 韦彩会, 等. 广西典型土壤上不同林分的土壤肥力分析与综合评价[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5229–5233. [Liu Yongxian, Xiong Liumei, Wei Caihui, et al. Changes of soil fertility and its comprehensive evaluation under different stands in typical types of soils in Guangxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5229–5233.]

[37] 程瑞梅, 肖文发, 王晓荣, 等. 三峡库区植被不同演替阶段的土壤养分特征[J]. 林业科学, 2010, 46(9): 1–6. [Chen Ruimei, Xiao Wenfa, Wang Xiaorong, et al. Soil nutrient characteristics in different vegetation successional stages of three gorges reservoir area[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(9): 1–6.]

[38] 崔楠, 吕光辉, 刘晓星, 等. 胡杨、梭梭群落土壤理化性质及其相互关系[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 476–482 [Cui Nan, Lyu Guanghui, Liu Xiaoxing, et al. Soil physical-chemical properties of *Populus euphratica* and *Halorylon persicum* communities and their relationship[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 476–482.]

[39] 路翔, 项文化, 任辉, 等. 中亚热带四种森林凋落物及碳氮贮量比较[J]. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2234–2240. [Lu Xiang, Xiang Wenhua, Ren Hui, et al. Litter biomass and its carbon and nitrogen storage in four subtropical forests in central southern China[J]. Journal of Ecology, 2012, 31(9): 2234–2240.]

[40] 多祎帆, 王光军, 闫文德, 等. 亚热带3种森林类型土壤微生物碳、氮生物量特征比较[J]. 中国农学通报, 2012, 28(13): 14–19. [Duo Yifan, Wang Guangjun, Yan Wende, et al. The Biomass comparison of soil microbial carbon and nitrogen of 3 kinds of forest types in subtropics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(13): 14–19.]

[41] 苗娟, 周传艳, 李世杰, 等. 不同林龄云南松林土壤有机碳和全氮积累特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 625–631. [Miao Juan, Zhou Chuanyan, Li Shijie, et al. Accumulation of soil organic carbon and total nitrogen in *Pinus yunnanensis* forests at different age stages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25 (3): 625–631.]

[42] Stribling J M, Cornwell J C. Nitrogen, phosphorus, and sulfur dynamics in a low salinity marsh system dominated by *Spartina alterniflora*[J]. Wetlands, 2001, 21(4): 629–638.

[43] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 126–133. [Chen Fusheng, Zeng Dehui, He Xingyuan. Soil nitrogen transformation and cycling in forest ecosystem[J]. Journal of Ecology, 2004, 23(5): 126–133.]

[44] 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡库区不同植被类型土壤养分特征[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 5978–5985. [Chang Chao, Xie Zongqiang, Xiong Gaoming, et al. Characteristics of soil nutrients of different vegetation types in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5978–5985.]

Study on the ecological benefits of a plantation mixed forest model in the Loess Plateau

LIU Xiao'e[1], SU Shiping[1], LI Yi[1], WANG Wei[2]

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Forestry and Grassland Administration of Maiji District, Tianshui 741020, Gansu, China)

Abstract: To study the ability of different plantation types to enhance the physical and chemical properties of soil, soil physical and chemical properties at layer depths of 0–80 cm under five typical plantations-*Platycladus orientalis* plantation, *Robinia pseudoacacia* plantation, *Populus alba* var *pyramidalis* plantation, *P. orientalis*-*R. pseudoacacia* mixed plantation, and *P. alba* var *pyramidalis*-*R. pseudoacacia* mixed plantation-were analyzed based on the results of field sampling and laboratory testing. The study revealed that (1) In mixed plantations, the bulk density and the physical properties of the soil, including soil maximum water holding capacity, capillary water holding capacity, field water holding capacity, soil total porosity, capillary porosity, noncapillary porosity, soil water content, and soil penetrability, were clearly better than those in the pure plantations. The pH values in mixed plantations and the *P. orientalis* plantation were lower than those in the *R. pseudoacacia* plantation and the *P. alba* var *pyramidalis* plantation. In mixed plantations, the soil organic matter, total nitrogen, mineral nitrogen, and total phosphorus contents were significantly greater than those in the pure plantations, whereas there was no significant difference in total potassium and available potassium among the various plantations. (2) The bulk density increased as soil depth increased in the 0–80 cm soil layers, whereas the other soil physical properties soil maximum water holding capacity, capillary water holding capacity, field water holding capacity, soil total porosity, capillary porosity, and noncapillary porosity decreased as the soil depth increased: however, there were no obvious differences in soil water content related to soil depth. The soil chemical properties including soil organic matter, total nitrogen, mineral nitrogen, available phosphorus, and available potassium, all decreased as the soil depth increased, though there were no significant differences in the pH values and soil total phosphorus and total potassium contents with soil depth. (3) Correlation analysis of the physical and chemical properties of the soil revealed significant correlations between soil organic matter and soil nitrogen, mineral nitrogen, total phosphorus, soil maximum water holding capacity, capillary water holding capacity, field water holding capacity, soil total porosity, capillary porosity, and noncapillary porosity, whereas there was significant negative correlation with soil bulk density; There was significant correlation between total nitrogen and soil mineral nitrogen, soil maximum water holding capacity, capillary water holding capacity, field water holding capacity, soil total porosity, capillary porosity, noncapillary porosity, but had significant negative correlation with soil bulk density. There was significant negative correlation between soil bulk density and soil maximum water holding capacity, capillary water holding capacity, field water holding capacity, soil total porosity, capillary porosity, and noncapillary porosity. The findings revealed that mixed plantation improved soil physical and chemical properties to a greater extent than did pure plantation. Therefore, this study implies that mixed plantation should be the main part of plantation management in this area in the future and that managers of pure plantations should considered transforming them into mixed plantations.

Keywords: physical and chemical properties of soil; pure forest; mixed forest; Lanzhou City; Loess Plateau